

AYSEL

**РОЛЬ ЗАХИСНОГО ВИМКНЕННЯ НАПРУГИ В ЗНИЖЕННІ РИЗИКУ
ЕЛЕКТРОТРАВМИ**

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи. Як свідчить досвід розслідування електротравм, ризик ураження виникає тоді, коли у результаті пробую ізоляції корпуси електрообладнання попадають під напругу, а людина торкається їх (Рис. 1, а) або коли людина при обслуговуванні чи ремонті безпосередньо торкається струмопровідних частин (рис. 1.1,б), що знаходяться під напругою, або що не дуже часто, у разі двофазного пробую ізоляції коли людина попадає під дію лінійної напруги (рис. 1.1,в) [1].

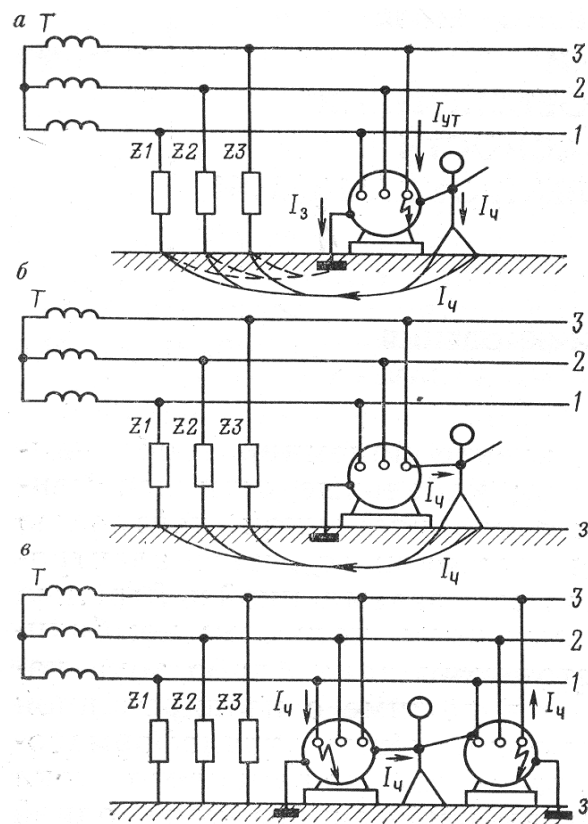


Рисунок 1.1 – Виникнення струму і ризик небезпеки ураження струмом:
 Т – вторинна обмотка живильного трансформатора; Z_1, Z_2, Z_3 – опір ізоляції фаз мережі; $I_{уТ}, I_3, I_ч$ – струми відповідно витоку, через заземлення і тіло людини

У всіх приведених випадках тіло людини становиться елементом електричного кола і по тілу проходить струм, який призводить до негативної дії

на органи людини і може привести до летального наслідку. Як відомо, ідея захисного вимкнення полягає у контролі опору ізоляції мережі відносно землі і коли опір, а ним може бути тіло людини, буде нижче мінімально допустимого, необхідно миттєво вимкнути напругу з мережі та таким чином знеструмити людину, попередивши небезпечні наслідки дії струму на організм, здійснюючи захисну дію. Теорія та практика захисного вимкнення достатньо повно розглянуті у літературних джерелах, наприклад [1.2]. Електричні критерії безпеки розглянуті у ГОСТ12.1.038-82 та у Звіті міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) [3.4], а вимоги до апаратури захисту від витоків струму були викладені у ГОСТ 22929-78 [5]. Але зв'язок вказаних робіт та електричних критеріїв з ймовірністю ураження висвітлені недостатньо. Тому дійсна робота, що присвячена цим питанням, вважається актуальною і важливою. Метою досліджень є обґрунтування ймовірнісних моделей ураження електрострумом як небезпечних подій та встановлення зв'язку ефективності захисного вимкнення електроенергії з параметрами надійності його функціонування.

Мета роботи і задачі дослідження. Викладена методологія оцінки впливу захисного вимкнення електроенергії на зниження ризику електротравми у системі електропостачання споживачів з ізолюваною нейтралі живильного трансформатора. Запропоновано ризик електротравми визначати по критеріям електробезпеки: ймовірності ураження людей електрострумом та кратності зниження ймовірності за рахунок захисної дії засобів електробезпеки. Показано пріоритетне значення захисного вимкнення напруги у зниженні ймовірності ураження електрострумом та кількості уражень у залежності від ймовірності безвідмовної роботи системи захисного вимкнення.

Об'єкт дослідження. Процес впливу захисного вимкнення напруги в зниженні ризику електротравми.

Предмет дослідження. Моделі уражень електрострумом для електроустановок з ізольованою нейтралі з захисним вимкненням.

Методи досліджень. Методи математичної логіки та статистичний аналіз.

Основні наукові та практичні результати, їх значення. Результати досліджень показали, що за отриманими даними захисне вимкнення забезпечує зниження ймовірності ураження струмом з $0,416 \cdot 10^{-2}$ до $9,6 \cdot 10^{-4}$, а з урахуванням інших засобів захисту з $6,37 \cdot 10^{-2}$ до $1,6 \cdot 10^{-4}$ (Табл. 2), тобто приблизно у 400 разів.

Загальна характеристика наукової роботи. У роботі проведено дослідження впливу захисного вимкнення напруги в зниженні ризику електротравми.

КЛЮЧОВІ СЛОВА. РИЗИКИ, ЗАХИСНЕ ВИМКНЕННЯ, ОПР ІЗОЛЯЦІЇ, СТРУМ ВИТОКУ, ІМОВІРНІСТЬ ПОДІЙ.

ДОВІДКА

Про ступінь самостійності студентської роботи

Перед студентом була поставлена наукова задача дослідити вплив захисного вимкнення напруги в зниженні ризику електротравми.

Дана задача виконувалась у такій послідовності:

- Розгляд схеми, класифікація електротехнічного обладнання;
- Побудова математичної моделі ураження електрострумом людини;
- аналіз статистичних даних стосовно оцінки ефективності впливу захисного вимкнення напруги в зниженні ризику електротравми ;

Розрахунок зниження ймовірності ураження електрострумом людини

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. Матеріали і результати досліджень.....	6
1.1 Розгляд схеми захисного вимкнення у мережі змінного струму	6
1.2 Класифікація випадків ураження людини електрострумом.....	7
1.3 Модель подій ураження струмом.....	8
2. Побудова математичної моделі ураження електрострумом.....	9
2.1 Побудова математичної моделі	9
2.2 Дослідження статистичних даних оцінка ефективності захисних засобів.....	11
3. Розрахунок зниження ймовірності ураження електричним струмом при застосуванні засобів захисту.....	13
ВИСНОВКИ.....	15
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	16

ВСТУП

Умовимося, що електроустановка складається з комутаційного апарату з захистом від струмів коротких замикань, електричного двигуна і електричних кабелів. Ідею захисного вимкнення розглянемо за допомогою спрощеної схеми електропостачання (рис.1.2).

Для реалізації ідеї захисного вимкнення у системі електропостачання передбачається загальний вимикач F та апарат контролю ізоляції з джерелом постійного струму G і релейним елементом вимкнення, що підключені до фаз мережі через фільтр Z_{ϕ} .

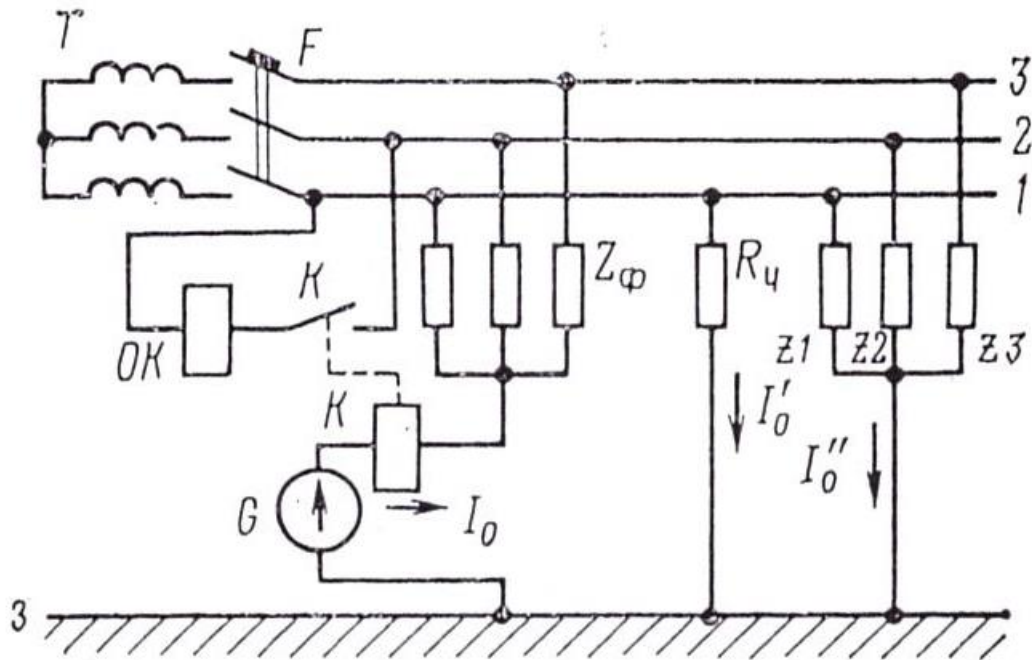


Рисунок 1.2 – Приклад схеми захисного вимкнення у мережі змінного струму

При низькому значенні опору контакт K розмикає коло котушки OK вимикача F , який і знеструмлює мережу, здійснюючи захисне вимкнення.

У трифазній мережі змінного струму у процесі експлуатації (рис. 1.1) ураження людини електрострумом може бути у трьох випадках: у разі випадкового доторкання до струмопровідної частини, яка знаходиться під напругою, у разі доторкання до корпусу, на який виникла замикання фази на корпус або двох різних фаз на різні корпуси. Ураження струмом відбуваються

несподівано, але їм як подіям передують ряд небезпечних обставин або станів, які теж можна розглядати як випадкові події:

- 1) електроустановка знаходиться під напругою з ймовірністю Q_1 ;
- 2) людина торкається струмопровідної частини з ймовірністю Q_2 ;
- 3) у процесі експлуатації виникають однофазні замикання на корпус з ймовірністю Q_3 ;
- 4) у процесі експлуатації виникають відмови функціонування заземлення з ймовірністю Q_4 ;
- 5) з часом опір ізоляції електричної мережі знижується до небезпечної величини з ймовірністю Q_5 ;
- 6) з часом опір тіла людини знижується до небезпечної величини з ймовірністю Q_6 ;
- 7) у процесі роботи виникають доторкання людей до струмопровідних частин з ймовірністю Q_7 ;
- 8) у процесі експлуатації виникають замикання двох різних фаз з ймовірністю Q_8 ;
- 9) у процесі роботи виникають відмови захисту від струмів короткого замикання з ймовірністю Q_9 ;
- 10) у процесі експлуатації виникають відмови захисного знеструмлення з ймовірністю Q_{10} .

Позначимо: Q_{Π} – ймовірність ураження струмом при відсутності або не дії захисного вимкнення, а Q_{Π}' – ймовірність ураження струмом при застосуванні діючого захисного вимкнення. Підкреслимо, що всі ймовірності є функціями часу, а виникнення небезпечних станів, як і подій ураження струмом у часовому виміру можна представляти потоками подій, що підпорядковуються закону Пуассона. Тому для визначення ймовірностей можна використовувати формулу[1]:

$$Q(\Delta t) = \lambda \Delta t, \quad (1.1)$$

де Δt – елементарна ділянка часу, на якій розглядається процес;
 λ – інтенсивність потоку подій, тобто середня кількість подій, що з'явилися на елементарній ділянці часу.

У разі відсутності захисного вимкнення всі небезпечні події та стани вважаються незалежними, тому їх ймовірності не залежать одна від одної. Але за наявності захисного вимкнення деякі ймовірності мають інше значення, ніж за його відсутності. Так, якщо захисне вимкнення за своїм принципом дії реагує на опір ізоляції мережі, то ймовірності замикань на корпус і низького опору ізоляції будуть менші аналогічних ймовірностей у разі, коли захисне вимкнення не застосовується або не діє. Тому такі ймовірності у разі застосування захисного вимкнення позначимо: Q_3' , Q_8' , Q_5' . З урахуванням викладеного, моделі подій «ураження струмом» можна зобразити у вигляді дерева відмов (рис. 1.3).

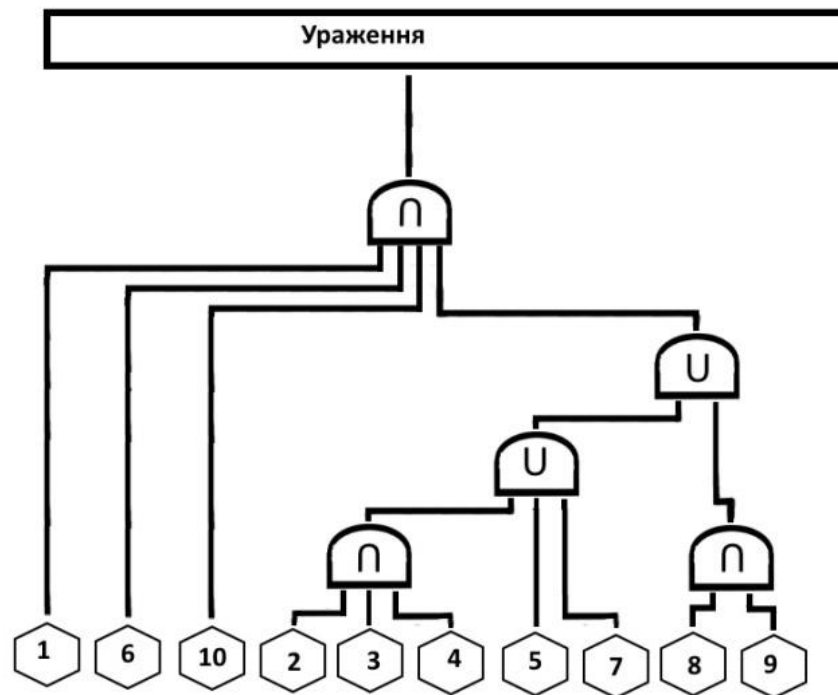


Рисунок 1.3 – Моделі уражень електрострумом для електроустановок з ізолюваною нейтралі трансформатора:

а – з захисним вимкненням; б – без захисного вимкнення (в схемі відсутня поз.10, що символізує апаратуру захисного вимкнення)

Для побудови математичних моделей ураження електрострумом врахуємо, що загальна ймовірність групи подій, послідовно наступних у схемі одна за іншою (логічна операція «і») підраховується по теоремі множення ймовірностей, а загальна ймовірність групи подій, паралельних у схемі дерева (логічна операція «або») підраховується за теоремою складання (додавання) ймовірностей.

У відповідності з викладеним, виконавши математичні перетворення, отримаємо математичну модель ураження електрострумом для електроустановки, що немає захисного вимкнення:

$$Q_{\Pi} = Q_1 Q_2 \{1 - (1 - Q_5 Q_7) \{1 - Q_2 Q_3 [1 - (1 - Q_4 Q_5)(1 - Q_8 Q_9)]\}\} \quad (1.2)$$

Для побудови математичної моделі ураження струмом у разі застосування захисного вимкнення врахуємо, що сучасні пристрої захисного вимкнення реагують на струм витоку або на опір ізоляції мережі та струм витоку, тому вони не тільки вимикають напругу при небезпеці ураження людини, але і у разі виникнення замикань на корпус і небезпечних знижень опору ізоляції навіть тоді, коли ще безпосередньої небезпеки для людини не виникає або коли вона зовсім відсутня. У разі застосування таких пристроїв події замикання на корпус або низького опору ізоляції можуть існувати тільки тоді, коли відмовило захисне вимкнення і відсутній контроль ізоляції. Тому ймовірності замикань на землю і ймовірність низького опору ізоляції будуть нижче чим без захисного вимкнення. Таким чином у разі застосування захисного вимкнення існування подій «однофазне замикання на корпус», «двофазне замикання на корпус» і «низький опір ізоляції» залежать від сумісного існування цих подій та події «відмова захисного вимкнення». Як відомо, ймовірність сумісного виникнення двох незалежних подій А і В рівна добутку ймовірностей цих подій, тобто

$$Q(A \text{ B}) = Q(A)Q(B). \quad (1.3)$$

З урахуванням цього при застосуванні захисного вимкнення, що реагує на опір ізоляції та замикання на корпус, маємо:

$$Q_3' = Q_3 Q_{10}; \quad Q_5' = Q_5 Q_{10}; \quad Q_8' = Q_8 Q_{10}' \quad (1.4)$$

Тоді математична модель ураження електрострумом у разі застосування захисного вимкнення буде:

$$Q_{\Pi}' = Q_1 Q_2 Q_{10} \{1 - (1 - Q_5 Q_7 Q_{10} \{1 - Q_2 Q_3 Q_{10} [1 - (1 - Q_5 Q_4 Q_{10})(1 - Q_8 Q_9 Q_{10})]\})\} \quad (1.5)$$

Для оцінки ефективності захисних засобів більш доцільно користуватись не ймовірностями їх відмов, а ймовірностями безвідмовної роботи, тому що такий показник—параметр їх надійності нормується технічною документацією і забезпечується на стадіях створення засобів захисту. Це особливо відноситься до пристроїв захисного вимкнення та захисту від струмів коротких замикань. Перехід від ймовірностей відмов до ймовірностей безвідмовної роботи здійснюється за виразами:

$$Q_{10} = 1 - P_{10}; \quad Q_4 = 1 - P_4; \quad Q_5 = 1 - P_5; \quad Q_9 = 1 - P_9, \quad (1.6)$$

де P_{10} , P_4 , P_5 , P_9 – ймовірності безвідмовної роботи відповідно захисного вимкнення, заземлення, ізоляції, захисту від струмів короткого замикання.

Якщо у формули (1.2) та (1.5) підставити значення Q_{10} , Q_4 , Q_5 , Q_9 з формули (1.6), отримаємо залежності ймовірності уражень електрострумом від параметрів надійності засобів захисту. Для оцінки ефективності доцільно використати статистичні дані про параметри небезпечних станів систем електропостачання вугільної дільниці, які отримані у свій час у Донбасі на шахті «Росія» шляхом 7,5 місяців спостережень (табл. 1.1) [5].

Комп'ютерні розрахунки показали, що за отриманими даними захисне вимкнення забезпечує зниження ймовірності ураження струмом з $0,416 \cdot 10^{-2}$ до $9,6 \cdot 10^{-4}$, а з урахуванням інших засобів захисту з $6,37 \cdot 10^{-1}$ до $1,6 \cdot 10^{-4}$ (табл. 1.2), тобто приблизно у 400 разів. Більш детальне вивчення ефективності засобів захисту, виконане за результатами комп'ютерних розрахунків при однаковій ймовірності їх безвідмовної роботи, рівній ймовірності безвідмовній роботі захисного вимкнення $P_{10} = 0,95$ (табл. 1.2), свідчить про наступне. Захисна дія електричної ізоляції мережі електропостачання знижує ймовірність ураження струмом приблизно у 14 разів (без врахування інших засобів захисту).

Таблиця 1 – Статистичні дані небезпечних станів системи електропостачання

Номер	Найменування стану	Середній час між виникненням небезпечного стану, год	Середній час існування небезпечного стану, год	Ймовірність небезпечного стану
1	Доторкання людини до корпусу електрообладнання	0,28	0,364	0,338
2	Однофазне замикання на землю або корпус	2692,75	40,17	0,166
3	Відмова заземлення	2980	446	0,02
4	Пошкодження ізоляції(для комбайна і конвеєра)	1555,63	142,44	0,166
5	Доторкання людини до струмопровідних частин пускової апаратури	1621	0,873	0,38
6	Однофазні парні замикання на землю	–	–	0
7	Відмова захисту від струмів коротких замикань	2352	150	0,06
8	Відмова захисного вимкнення (захисту від витоків струму)	244	1,25	0,05

Ефективність захисного заземлення і захисту від коротких замикань у порівнянні з захисним вимиканням не велика, що пояснюється тим, що вони не впливають на ураження струмом у разі дотику людини до струмопровідних частин. Заземлення є ефективним засобом захисту від уражень струмом тільки тоді, коли людина торкається корпусу, який виявився під напругою.

Таблиця 1.2 – Зниження ймовірності ураження струмом при застосуванні засобів захисту

Засоби захисту від уражень електрострумом	Ймовірність ураження струмом Q_{II}	Кратність зниження ймовірності ураження n
Захисне вимикання без захисної дії заземлення ізоляції і захисту від струмів коротких замикань з врахуванням заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань	$9,6 \cdot 10^{-4}$	430
Електрична ізоляція мережі електропостачання: без врахування захисного вимикання, заземлення і захисту від струмів коротких замикань	$1,58 \cdot 10^{-4}$	403
без врахування захисного вимикання, але з врахуванням заземлення і захисту від коротких замикань	$3 \cdot 10^{-2}$	13,8
Захисне заземлення: без врахування захисного вимикання, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань з врахуванням ізоляції, і захисту від струмів коротких замикань, але без врахування захисного вимкнення	$1,95 \cdot 10^{-2}$	19,5
Захист від струмів коротких замикань: без врахування захисного вимикання, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань з врахуванням ізоляції, і захисту від струмів коротких замикань, але без врахування захисного вимкнення	$3,8 \cdot 10^{-1}$	1,1
Захист від струмів коротких замикань: захисного вимкнення	$6,39 \cdot 10^{-1}$	1,13

без врахування захисного вимикання, заземлення і ізоляції	$4,15 \cdot 10^{-1}$	1,0
з урахуванням заземлення і ізоляції, але без врахування захисного вимикання	$6,37 \cdot 10^{-2}$	1,13

Аналіз залежності $Q_{\Pi}'=f(Q_{10})$ або $Q_{\Pi}'=f(1-P_{10})^2$ свідчить, що вони є достатньою для практики точністю можуть бути представлені формулами:

$$Q_{\Pi}'=Q_{\Pi}Q_{10}^2 \text{ або } Q_{\Pi}'=Q_{\Pi}(1-P_{10})^2 \quad (1.7)$$

При цьому похибка ймовірності ураження струмом не вище 9 %, коли розглядається зниження ймовірності ураження за рахунок захисного вимкнення без врахування заземлення і захисту від струмів коротких замикань, та не вище +1 %, коли разом з захисним вимкненням враховується заземлення і захист від струмів коротких замикань.

У відповідності з формулою (1.7) можна визначити кратність зниження ймовірності ураження електрострумом за наявності захисного вимкнення у системі електропостачання споживачів:

$$n=Q_{\Pi}/Q_{\Pi}'=1/(1-P_{10})^2 \quad (1.8)$$

Кратність показує у скільки разів зменшується ймовірність ураження струмом за рахунок застосування засобів безпеки, у даному випадку формула (1.8) відтворює залежність кратності зниження ймовірності ураження струмом від одного з показників надійності захисного вимкнення – ймовірності безвідмовної роботи засобів системи захисного вимкнення. Чим більша Надійність захисного вимкнення тим у більшій кратності зменшується ймовірність ураження струмом, тобто зменшується ризик електричного травмування людей (табл. 1.3).

З приведених даних видно пріоритетне значення надійності функціонування захисного вимкнення електроенергії як засобу попередження уражень людей струмом. Виходячи з реальної можливості у забезпеченні надійності технічних засобів, можна розраховувати на зниження ймовірності зниження ризику ураження струмом за рахунок захисного вимкнення не менше, ніж у 100 разів. При цьому для практичного використання кратність зниження ризику можна визначати за

спрощеною формулою, виходячи тільки з фактичної ймовірності безвідмовної роботи системи захисного вимкнення електроенергії. Для забезпечення надійності апаратури захисного вимкнення в умовах експлуатації необхідно суворо здійснювати її перевірку справності та профілактику відповідно до вимог виробників апаратури як це викладено у роботах [1,8].

Таблиця 1.3 – Зменшення ризику ураження струмом у залежності від надійності захисного вимкнення

Кратність зниження ймовірності Ураження електрострумом	Ймовірність безвідмовної роботи захисного вимкнення						
	0	0,5	0,834	0,9	0,95	0,98	0,99
За рахунок захисного вимкнення без врахування заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань	1	4,025	36,6	101	403,2	2572,7	10 011
За рахунок захисного вимкнення з урахуванням заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань	1	4,1	38,8	107,8	433,5	2712,4	10 892

ВИСНОВКИ

1. Ураження електрострумом можна представити у часі як пуассонівський потік таких випадкових подій, що дає можливість визначати ймовірність ураження як добуток інтенсивності потоку і часового терміну, за який розглядаються події.

2. Ризик ураження струмом, який оцінюється ймовірністю цієї події, залежить від ймовірностей дотику людини до струмопровідної частини та корпусу при однофазному чи двофазному замиканні на корпус, пошкодження ізоляції електромережі, відмов заземлення, захисту від коротких замикань і захисного вимкнення електроенергії, та обчислюються як логічна операція «і», коли у «дереві відмов» такі небезпечні стани слідуєть по одній гілці послідовно одна за другою, чи як логічна операція «або» коли вони слідуєть альтернативно по різних гілках «дерева відмов».

3. Доведено, що ефективність захисного вимкнення, як засобу електробезпеки, набагато перевищує ефективність разом взятих заземлення, ізоляції та захисту від замикань на землю, тому що, контролюючи опір електромережі відносно землі, захисне вимкнення попереджає існування під напругою пошкодження ізоляції мережі, однофазних та двофазних замикань на землю, а також протікання струму через тіло людини і небезпечних струмів витоку з мережі шляхом вчасного вимикання напруги.

4. Запропоновано для практики визначати відносне зниження ймовірності ураження електрострумом за рахунок захисного вимкнення за обґрунтованою формулою у залежності від ймовірності його безвідмовної роботи або зворотно пропорційно квадрату ймовірності відмов захисного вимкнення. В умовах експлуатації рекомендується суворо витримувати вимогу керівництв з експлуатації апаратури захисту від витоків струму щодо її справності шляхом використання передбаченої у конструкції апаратів кнопки перевірки справності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок – М.: Недра, 1980, – 334 с.
2. Якобс А. И. Электробезопасность в сельском хозяйстве / А. И. Якобс, А. В. Луковников // М.: Издательство «Колос». – 1981. – 273 с.
3. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / Долин П. А. // Учеб . пособие для вузов . 2-е узд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 448 с.
4. Колосюк В. П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок – М.: Недра, 1987. – 407 с.
5. Ткачук С П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С. П. Ткачук, В. П. Колосюк, С. А. Ихно // – К.: «Основа». – 2000. – 695 с.
6. Аппараты защиты от токов утечки рудничне для сетей напряжением до 1200 В. Общие Тенические условия. ГОСТ 22929 – 78 – М.: Госстандарт СССР, 1979. – 17 с.
7. Технический отчет IEC 479 – 1. Действие тока на людей и домашний скот. Часть 1: Общие аспекты. IEC479 – 1. Третье издание. – 1994. – 1994. – 09.
8. Колосюк В.П., Товстик Ю.В. Электробезопасность в горной промышленности : монография / Под ред. д.т.н. В.П. Колосюка: – Донецк: Изд-во «Ноулиж» (донецкое отделение), 2014. – 475 с.